

Le particelle elementari

1

Come l'astronomia è la scienza dell'infinitamente grande, la fisica del nucleo e quella delle particelle elementari è la scienza dell'estremamente piccolo. Per avere qualche riferimento, il nucleo atomico ha una grandezza di 10^{-14} m, seguito da quattordici zeri ed uno alla fine. Nel nucleo si trovano protoni e neutroni. A grande distanza ruotano gli elettroni. Potete immaginare che, se il nucleo è un pallone da calcio posto nel centro di un campo di gioco, gli elettroni ruotano su una circonferenza che contiene interamente il campo stesso. Tra nucleo e gli elettroni c'è il vuoto assoluto. Ecco che la materia è quindi una struttura essenzialmente vuota: tanti piccoli puntini pesanti (i nuclei) contornati a grande distanza da leggeri elettroni. Se in un solo istante tutto gli elettroni scomparissero, la Terra si trasformerebbe in una pallina di circa 10 cm di diametro. In quella pallina sarebbe concentrata l'intera sua massa, cioè circa 6×10^{24} kg. Già questo succede in natura: sono le stelle di neutroni, che hanno una massa grandissima concentrata in un piccolo volume. È il destino che spetta a tutte le stelle di grande massa: esplodere in una supernova e diventare poi una stella di neutroni o un buco nero. E qual è la massa di un protone? In kg sarebbe circa $1,67 \times 10^{-27}$ kg, seguito da 26 zeri e un uno finale. Per l'elettrone, $9,1 \times 10^{-31}$ kg, 30 zeri decimali con 1 alla fine. Ma questo numero è troppo piccolo e poco pratico. Si preferisce esprimere la massa delle particelle in MeV, cioè in termini di energia. Per il protone circa 938, poco di più il neutrone. Molto più piccolo l'elettrone, 0,51 MeV. La lettera M sta per un milione. Come ricorderete, il neutrino ha una massa molto piccola (se ce l'ha), addirittura 0,51 eV, quindi un milione di volte più piccolo del già minuscolo elettrone. Minuscolo però importantissimo, perché il nostro mondo, la nostra chimica, la nostra biologia, la nostra tecnologia è dovuta all'elettrone ed ai legami che instaura con gli elettroni di altri atomi. Nella vita pratica, il nucleo si può anche trascurare.

Purtroppo, ogni riga che scrivo implicherebbe pagine e pagine di approfondimenti. Mi sono messo in un'impresa impossibile! Magari la prossima volta parlerò delle possibili classificazioni delle particelle.

2

I fotoni sono oggetti costretti per tutta la loro esistenza a viaggiare alla velocità della luce, finché non interagiscono con la materia (e poi magari si trasformano in altri fotoni a frequenza diversa). Poiché la teoria della relatività impone che all'avvicinarsi alla velocità della luce la massa di un oggetto tenda a diventare infinita, il fotone non può avere massa, perché altrimenti sarebbe infinita. Ma possiede sia energia che quantità di moto. La prima è hf , (h è la costante di Planck, f è la sua frequenza), la seconda è energia diviso (tempo per la velocità della luce). Il fotone si può considerare sia una particella sia un'onda con una certa frequenza (dualismo onda-corpuscolo). D'altra parte anche gli oggetti normali si possono considerare sia particelle che onde di una certa frequenza (De Broglie), ma l'aspetto ondulatorio è del tutto irrilevante per masse macroscopiche. È un altro splendido esempio di come la natura sia simmetrica. L'elettrone si descrive come un oggetto ruotante intorno al nucleo per comodità didattica. In realtà la meccanica quantistica gli assegna una funzione d'onda, cioè una funzione che descrive la probabilità di trovarlo in un certo punto in un certo istante. Ma dobbiamo considerare a questo punto anche il principio di indeterminazione di Heisenberg. Semplificando: "non è possibile conoscere perfettamente posizione e quantità di moto di una particella" dove la quantità di moto è la massa moltiplicata per la velocità dell'oggetto.

Siamo infine arrivati alle particelle elementari. Esse si possono classificare in vari modi. Uno dei principali è suddividerle in base alla forza cui sono soggette. Ecco quindi che abbiamo i leptoni (particelle sottoposte alla forza debole, ma non alla nucleare forte) e gli adroni (particelle sottoposte sia alla forza debole che alla forza forte). All'inizio i leptoni erano considerate particelle leggere, gli adroni invece oggetti pesanti; scoperte successive alla fine dello scorso secolo evidenziarono però la presenza anche di leptoni pesanti e quindi la distinzione in base alla massa non ebbe più tanto senso. Molto più importante è invece osservare che i leptoni sono oggetti elementari, vale a dire senza una sottostruttura. Ad esempio, il leptone fondamentale è l'elettrone, che è elementare nel senso che al suo interno non c'è evidenza di alcuna altra struttura. Ce ne sono poi altri cinque, scoperti tutti nello scorso secolo (l'elettrone invece si scoprì nell'800). Sono il muone, il tauone e poi i tre neutrini corrispondenti a questi tre leptoni elencati. Quindi sei leptoni in tutto. Per dare un esempio della massa, ricordo che l'elettrone ha una massa di 0,51 Mev, mentre il tauone addirittura 1777 Mev, quindi addirittura quasi il doppio del pesante protone. Gli adroni sono invece molto più numerosi di sei, addirittura centinaia, ma, protone e neutrone a parte, tutti instabili, con una vita media effimera, nel senso che vengono originati e subito decadono in tempi dell'ordine di 0, molti zeri ed uno altro numero alla fine. Ma sugli adroni vi parlerò in un'altra occasione, perché riserveranno una sorpresa, quella dei fascinosi quark. Torno ai leptoni. Quattro leptoni sono stabili, l'elettrone e i tre neutrini, instabili muone e tauone. La storia del muone è particolarmente interessante perché fornì una prova inconfutabile dell'esattezza della teoria della relatività di Einstein, che vi racconto brevemente. Una delle conseguenze più strane di quella teoria è che il tempo non passa allo stesso modo in tutti i sistemi di riferimento, ma scorre più lentamente quando si viaggia a velocità altissime, vicine a quella della luce (ovviamente nessuna astronave potrà mai avere tali velocità). Per due gemelli, uno che restasse a Terra ed uno che viaggiasse a velocità altissime nello spazio, il tempo sarebbe diverso. Al suo ritorno, il gemello che ha fatto il viaggio sarebbe invecchiato molto meno di quello rimasto a Terra. Orbene, i muoni sono particelle a vita molto limitata prodotte dai raggi cosmici, in particolare protoni solari, che interagiscono con atomi dell'alta atmosfera. Una volta creati, viaggiando alla velocità della luce, si dirigono verso il livello del mare ma, avendo una vita brevissima, decadono prima di arrivarci. In realtà, dispositivi rivelatori posti a livello del mare, ne osservano una grande quantità? Come mai? Facile spiegarlo. Nel loro sistema di riferimento quei muoni, viaggiando a velocità altissime, sperimentano un passare del tempo più lento. La loro vita quindi si allunga e permette loro di giungere fino al suolo e di essere rivelati.

L'ultima volta abbiamo parlato dei 6 leptoni, le particelle più leggere tra i quali l'elettrone, che con il neutrino elettronico rappresenta la prima generazione dei fermioni leptonici. Ci sono altre due generazioni, quella del muone con il suo neutrino e infine la terza, quella del tauone, pure con il suo neutrino. Ricerche su una quarta generazione non hanno dato esito. Ricordate quindi il numero sei, già citato, per il totale dei leptoni; importante perché fornirà un potente mezzo per scoprire una simmetria dell'universo. Ora andiamo a parlare della seconda categoria in cui si possono classificare le particelle, gli adroni, soggetti alle due forze nucleari, quella debole, ma soprattutto quella forte. Prima chiariamo il termine fermioni che compare sopra. Le particelle si possono infatti anche classificare in fermioni (in onore di Fermi) e bosoni. I primi hanno numero quantico di spin semintero (immaginate si possa associare ad una specie di moto di trottola che può avere la particella), i secondi invece hanno spin intero. Per i fermioni vige un importante principio, quello di esclusione del Pauli: due fermioni identici non possono occupare lo

stesso stato quantico. Torniamo agli adroni, i quali si possono dividere a loro volta in barioni e mesoni. I mesoni sono generalmente più leggeri e sono instabili, cioè decadono in tempi brevissimi in altre particelle. Hanno spin intero uguale a zero. I barioni sono invece dei fermioni a spin semintero; anch'essi decadono velocemente tranne i due più importanti: i protoni e i neutroni. Abbiamo già detto che il protone, per quanto ne sappiamo, ha vita eterna, anche perché ha la massa più piccola tra i barioni e quindi non può dare luogo ad altri barioni decadendo. Il neutrone ha vita eterna se è all'interno del nucleo, ma se viene isolato, ha una vita media di circa 32 minuti e poi decade in protone + elettrone + antineutrino. Si suole dire che viviamo in un universo barionico. Infatti la materia è fatta da protoni e neutroni, oltre che da elettroni, molto più leggeri. Assieme agli elettroni, ai tre neutrini, al fotone, il protone ed il neutrone sono le uniche particelle stabili. Tutte le altre particelle di un numeroso zoo sono instabili e vengono prodotte per collisioni spontanee, soprattutto con i raggi cosmici o negli acceleratori di particelle. Curiosamente, contro l'intuizione, le particelle instabili più pesanti sono state scoperte per ultime. Per produrle, infatti, ci vogliono energie molte alte negli acceleratori che via via si rendono sempre più disponibili. Verso gli anni '60 del novecento si prese coscienza di una possibile sottostruttura degli adroni, cioè, al contrario dei leptoni che sono particelle elementari, si ipotizzò che avessero una struttura interna complessa. Nel 1964 Gell-Mann e Zweig suggerirono che all'interno degli adroni ci fossero oggetti elementari, che vennero chiamati quark e anti-quark. Nel 1968 si pervenne alla prova sperimentale della loro presenza. Ma quella dei quark diventa un'altra storia, ancora più appassionante di quella finora descritta. Alla prossima puntata.

5

Nel 1964 Gell-Mann e, indipendentemente, Zweig, ipotizzarono quindi che gli adroni non fossero oggetti senza struttura, bensì fossero composti da particelle veramente elementari, ai quali Gell-Mann diede il nome di quark (nome di fantasia tratto da un romanzo di James Joyce). All'inizio se ne introdussero solo di tre tipi: il quark up (u), il quark down (d), il quark strange (s). All'epoca questi tre quark, componendosi variamente, erano sufficienti per descrivere tutti gli adroni conosciuti. Questi tipi furono chiamati "sapori" (nulla a che vedere con il significato consueto della parola). Il quark strange, "strano", si chiama così in quanto è presente nelle particelle "strane", così chiamate in quanto interagiscono con la classica tipologia delle interazioni nucleari forti, ma decadono con i tempi relativamente lunghi delle interazioni nucleari deboli. Importante, per le conseguenze di cui parleremo in seguito, è che i quark si comportano da fermioni, quindi hanno spin semintero.

Nella teoria dei quark, il protone è costituito da tre quark uud, il neutrone da tre quark udd. Infatti i barioni sono composti da tre quark, mentre i mesoni hanno nel loro interno due soli quark, o, meglio, un quark ed il suo antiquark. Ad esempio, il mesone pigrco negativo ha composizione d + antiquark u.

I tre quark u,d, s hanno masse rispettivamente 2, 5, 95 MeV. Nel 1970 fu ipotizzata l'esistenza di un quarto quark di massa maggiore (1300 MeV) a cui si assegnò il nome di charm (c), cioè "fascino". Tale era la fascinazione che questa nascente teoria dei quark esercitava sugli scienziati, che, di loro, hanno già un'estrema fantasia ed umorismo. Nel 1974 fu scoperta infatti una particella che conteneva il quark c. Pochi anni dopo si introdusse un quinto quark, di nome beauty, bellezza, di 4600 MeV. Eravamo quindi arrivati a cinque quark come numero dei costituenti degli adroni. Il confronto con i leptoni (sei particelle in totale) rendeva allettante l'idea di una simmetria, che avrebbe imposto l'esistenza di un sesto quark per gli adroni, le particelle pesanti, come sei erano i componenti dei leptoni, le particelle leggere, quelle sì elementari e senza struttura interna. E infatti il nuovo quark che si introdusse fu il quark truth (verità), di

ben 174.000 MeV di massa. Nel 1995 tale quark molto pesante fu rivelato (indirettamente, capirete più avanti il perché di questo avverbio) al Tevatron del Fermilab di Chicago. Attualmente il quark beauty si chiama bottom (b) e il quark truth si chiama top (t). La simmetria è un metodo d'indagine molto potente in fisica.

Spesso ad una simmetria si abbina un principio di conservazione ed i principi di conservazione sono formidabili strumenti per capire il mondo fisico. E di principi di conservazione che riguardano i numeri quantici ce ne sono numerosi, ma di essi non parleremo. Basti pensare, comunque, che applicando un principio scelto a caso, quello di conservazione del numero leptonico, se in un decadimento si nota che una particella ha all'inizio un certo numero e alla fine le particelle ottenute nel decadimento hanno una somma complessiva del numero in questione diversa da quello di partenza, allora tale decadimento non può esistere. E infatti in natura mai si sono rivelati decadimenti che violassero i principi di conservazione dei numeri quantici finora teorizzati.

Ricorderete che il protone ha una massa di 938 MeV. Essendo costituito da tre quark uud, facendo la somma delle singole masse dovrebbe avere una massa totale $2+2+5 = 9$ MeV. Evidentemente i conti non tornano proprio. Anche inserendo i gluoni che all'interno del nucleo sono i quanti mediatori che tengono uniti i quark in modo che tali legami mai si possano spezzare, non cambia il calcolo. Infatti i gluoni hanno massa zero e quindi non possono contribuire alla somma complessiva. Dove ricercare quindi questa massa mancante? Nell'energia di legame che tiene uniti i quark. Per l'equazione di Einstein che recita Energia = massa moltiplicata per la velocità della luce al quadrato, l'energia equivale alla massa. Dopo l'osservazione che abbiamo fatto nelle precedenti puntate, riguardante il vuoto complessivo della struttura della materia, tanto che, se la Terra fosse priva di elettroni, potrebbe collassare in una sferetta di soli 10 cm di diametro e, analogamente, l'intera specie umana vivente potrebbe essere contenuta in una piccola zolletta di zucchero, abbiamo ora un'altra grande sorpresa: la nostra massa corporea, cioè essenzialmente la massa dei protoni e neutroni contenuti nei nuclei atomici dei vari elementi che ci compongono (vista la piccola massa degli elettroni, che è trascurabile) è essenzialmente energia. Ovviamente nulla a che vedere con l'energia psichica, l'energia dei chakra, ed altri tipi di energia fantasiose, mai misurate quantitativamente. Un'energia invece verificata, esistente, reale, misurabile.

Nella prossima puntata parleremo dei gluoni (da glue, colla). La colla che tiene uniti i quark all'interno dei nuclei. Poi dovremo introdurre un altro numero quantico per i quark: oltre ai sei sapori, dovremmo assegnare loro altri tre numeri quantici, che chiameremo fantasiosamente colori. Pertanto i quark compariranno complessivamente in 6 per 3 modalità: 18 tipologie complessive. Lo studio relativo costituirà la cromodinamica quantistica (QCD), teoria fondamentale della forza nucleare forte inserita nel modello standard.

Prima di parlarvi di cromodinamica quantistica, inserisco una tabella riassuntiva delle particelle più importanti dell'affollato zoo che ho provato a descrivervi fino ad ora. Noterete quindi varie colonne e quattro raggruppamenti orizzontali: i bosoni (sono i quanti mediatori delle quattro interazioni fondamentali della natura), i leptoni (particelle elementari leggere, tra i quali l'importante elettrone), gli adroni pesanti (barioni, tra i quali il protone ed il neutrone), gli adroni meno pesanti (mesoni). Distinzione che, come già osservato, si mantiene solo per comodità, dai momenti che esistono mesoni più pesanti dei barioni. Nelle colonne trovano poste informazioni sul nome, sul simbolo, sul simbolo dell'antiparticella, sull'energia e sul tempo di dimezzamento. Noterete che quasi tutte le particelle hanno anche un'antiparticella che differisce dalla sua sorella per qualche numero quantico, come la carica. Ad esempio, l'antiparticella dell'elettrone (con carica negativa e) è il positrone (stessa massa, ma con carica positiva +e). Un fotone ad alta energia,

può in certe situazioni, dissolversi e dare luogo alla creazione di una coppia elettrone-positrone. Viceversa, trovandosi in un universo di materia, le particelle di antimateria hanno una vita brevissima. Incontrando la loro sorella (di materia) si annichilano, dando origine a fotoni o ad altre coppie di particelle, sempre rispettando il vincolo che l'energia di partenza dev'essere uguale a quella finale. Avrete notato che questo principio di conservazione non è rispettato dalla massa: un fotone (con massa nulla) si può trasformare in due particelle, elettrone e positrone, di massa 2 moltiplicato per 0,51 MeV/velocità della luce al quadrato.

Famiglia	Particella	Simbolo particella	Simbolo antiparticella	Energia (MeV)	Emivita (s)	CARICA	SPIN	DECADUTE
Bosoni	Fotone	γ	γ (*)	0	Stabile	0	1	$e^+ \nu; \mu^+ \mu; e^+ e^-$
	W^+	W^-	W^+	$8,04 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^{-25}$	1	1	$e^+ \nu; \mu^+ \mu; e^+ e^-$
	Z^0	Z^0	Z^0 (*)	$9,12 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^{-25}$	0	1	$e^+ e^-; \mu^+ \mu; e^+ e^-$
	Gluone	g	-	0	-	0	1	$2\gamma; ?$
	Higgs	H^0	H^0 (*)	$125 \cdot 10^3$	$2,9 \cdot 10^{-13}$	0	0	-
Leptoni	Elettrone	e^- oppure β^-	e^+ oppure β^+	0,511	Stabile	-1	1/2	$e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$
	Muone	μ^-	μ^+	105,7	$2,2 \cdot 10^{-6}$	-1	1/2	$\mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau; \dots$
	Tau	τ^-	τ^+	1777	$2,9 \cdot 10^{-13}$	-1	1/2	-
	Neutrino elettronico	ν_e	$\bar{\nu}_e$	$< 2 \cdot 10^{-6}$	Stabile	0	1/2	-
	Neutrino muonico	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	$< 0,19$	Stabile	0	1/2	-
	Neutrino tauonico	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$	$< 18,2$	Stabile	0	1/2	-
Adroni (mesoni)	Pione	π^+	π^-	139,6	$2,6 \cdot 10^{-8}$	1	0	$\mu^+ \nu_\mu$
		π^0	π^0 (*)	135,0	$8,4 \cdot 10^{-17}$	0	0	2γ
	Kaone	K^+	K^-	493,7	$1,2 \cdot 10^{-8}$	1	0	$\mu^+ \nu_\mu; \bar{\nu}_\tau \nu_\tau$
		K^0	\bar{K}^0	497,6	-	0	0	$\pi^+ \pi^-; 2\pi^0$
	Eta	η^0	η^0 (*)	547,3	$< 10^{-18}$	0	0	$2\gamma; 3\pi^0; \pi^+ \pi^-$
Adroni (barioni)	Protone	p	\bar{p}	938,3	Stabile	1	1/2	$p e^- \bar{\nu}_e$
	Neutrone	n	\bar{n}	939,6	886	0	1/2	$p \pi^-; n \pi^+$
	Lambda	Λ^0	$\bar{\Lambda}^0$	1116	$2,6 \cdot 10^{-10}$	0	1/2	$p \pi^0; n \pi^+$
	Sigma	Σ^+	$\bar{\Sigma}^-$	1189	$8,0 \cdot 10^{-11}$	1	1/2	$\Lambda^0 \gamma$
		Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$	1193	$7,4 \cdot 10^{-20}$	0	1/2	$n \pi^-$
		Σ^-	$\bar{\Sigma}^+$	1197	$1,5 \cdot 10^{-10}$	-1	1/2	$\Sigma^0 \pi^-; \Lambda^0$
	Omega	Ω^-	$\bar{\Omega}^+$	1672	$8,2 \cdot 10^{-11}$	-1	3/2	-

Un universo di antimateria sarebbe del tutto simmetrico ad un universo di materia, quale il nostro. Come mai siamo in un mondo di materia anziché di antimateria? Una possibile spiegazione immagina un big bang (ne parleremo più avanti) in cui si produssero quantità identiche di particelle di materia e di antimateria, o meglio, quasi identiche. Si stima che, per ogni milione di particelle di antimateria, se ne siano create un milione + una particella di antimateria. Il milione di materia si annichilò con il milione di antimateria, emettendo fotoni. Rimase in vita una sola particella per milione di materia, che moltiplicata per tutti i miliardi di casi simili, produsse l'attuale mondo di materia. Quindi per ogni particella di materia ci aspettiamo un milione di fotoni...e questa è anche la proporzione suffragata dai dati sperimentali.

Dell'interazione nucleare forte tra protoni e neutroni nel nucleo vi ho già parlato. Ci sono forze attrattive che si attivano quando la distanza tra queste particelle è molto piccola e riesce a vincere la forza elettromagnetica repulsiva che è attiva tra due protoni con la stessa carica positiva. La forza nucleare forte è a corto raggio; l'elettromagnetica, come la gravitazionale, è invece a lungo raggio, cioè rimane attiva, pur se molto indebolita, anche a grandi distanze tra le particelle in esame. I quanti mediatori della forza nucleare forte sono dei mesoni, i pioni, teorizzati prima da Majorana e poi da Yukawa e infine rivelati nel 1947 nei raggi cosmici. Ma dopo avere esaminato la forza che tiene insieme i nucleoni (protoni e neutroni) nel nucleo, vediamo un'altra forza nucleare forte, quella che tiene insieme i quark all'interno del protone e del neutrone e, in generale, di tutti gli adroni. Anche i quark sono carichi, con cariche frazionarie di quella dell'elettrone. Ad esempio, il protone ha i tre quark uud; il quark up ha carica $2/3$ di quella dell'elettrone (che chiameremo e) e quindi essendo due quark up, hanno insieme carica positiva $(4/3)e$. Ma il protone ha carica e . Pertanto il quark d (down) ha carica $-(1/3)e$. La somma è quindi e , che è la carica dell'elettrone, però positiva, mentre invece l'elettrone ha carica e negativa. Analogamente si comportano tutti gli adroni per arrivare, per somma di cariche di quark, alla loro carica. Ma quale forza tiene insieme alla fine i quark dentro al protone o al neutrone? E' ancora una forza nucleare forte, ma i quanti mediatori di questa forza si chiamano gluoni. E' però ora necessario introdurre quella che si chiama cromodinamica quantistica (QCD), per capire il comportamento dei gluoni, particelle neutre e senza massa. Ricorderete che i fermioni sono le particelle a spin semintero. Per queste particelle vige il principio di esclusione del Pauli, per il quale due particelle non possono essere accoppiate con un uguale stato quantico. I fermioni non amano quindi la compagnia dei loro simili. Ebbene, i tre quark uud contenuti nel protone non potevano coesistere, avendo gli stessi numeri quantici. Greenberg introdusse pertanto un nuovo numero quantico, il colore, per cui i quark si potevano classificare in blu, rossi e verdi (B, R, G). Oltre al sapore (up, down, ecc.), ai quark si assegnava quindi un'altra proprietà. Ecco che i quark diventavano quindi 18: 6 sapori moltiplicati per 3 colori. I tre quark di colore diverso potevano stare all'interno di un unico protone, essendo in stati che differivano per il colore. Il termine colore, come quello del sapore, non ha evidentemente alcuna attinenza con il consueto significato della parola. Descrive solo una particolare caratteristica del quark stesso. Allora, tutti i barioni hanno tre quark di colore diverso, mentre gli altri adroni, i mesoni, hanno un quark di un colore e un antiquark con il rispettivo anticoloro. Come l'interazione elettromagnetica avviene tra particelle dotate di carica, così l'interazione nucleare forte dentro al protone avviene tra quark dotati di colore. Come l'interazione elettromagnetica è mediata da scambi di fotoni, così l'interazione nucleare forte è mediante da scambi di gluoni. Ma c'è una differenza: mentre il fotone è unico, di gluoni ce ne sono di otto tipi diversi: il gluone verde-antirosso, il gluone, blu-antiverde e così via. Il gluone trasporta il colore e nel processo di scambio di un gluone tra due quark il colore dei quark cambia, ma non il loro sapore (cioè un quark down, ad esempio, rimane down, ma cambia il suo colore). Ma c'è un'altra caratteristica singolarissima nella forza forte mediata dai gluoni: è una forza debole alle piccole distanze, ma diventa molto intensa alle grandi distanze (parliamo sempre delle distanze infinitesimali all'interno del nucleo). Immaginate che il gluone sia una specie di molla che unisce due quark. Quando la distanza tra i due quark è "piccola" la molla è a riposo e non esercita che una debole forza. Non appena si tenta di allontanare i due quark tra di loro, la molla si allunga ed applica forze molto intense che non permettono ai quark di separarsi. Ed ecco spiegato il motivo per i cui, nonostante numerosissimi tentativi, non si è mai riusciti a rivelare sperimentalmente i quark, neanche ad altissime energie, vale a dire ad estrarli dal protone. E' probabile che rimarranno per sempre confinati dentro agli adroni che li contengono, protone e neutrone innanzitutto. Non a caso la cromodinamica quantistica è conosciuta anche come teoria del "confinamento dei quark".

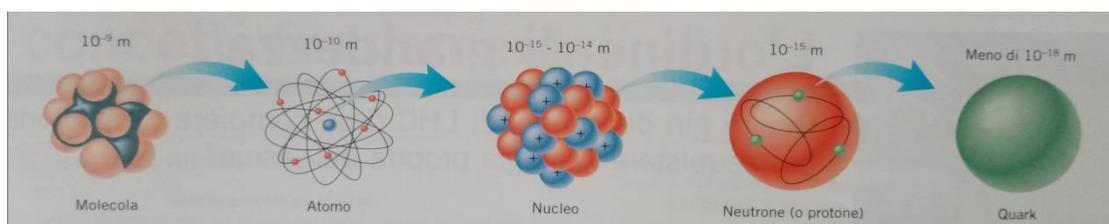
Dovete quindi fare un atto di fede per credere a conclusioni in cui manca la conoscenza diretta di quello che si descrive, il quark. Ma la fisica nucleare è un continuo atto di fede: lavora su acceleratori dalle

energie impensabili, dentro ai quali si fanno collidere elusivi fasci di particelle. E da questi urti si generano altre particelle e lo scienziato deve elaborare una quantità impressionante di informazioni, quasi sempre sotto forma di numeri. Alla fine, però, anche la teoria più fantasiosa e bizzarra è suffragata da una quantità notevolissima di evidenze sui vari comportamenti delle particelle ed è per questo che il modello standard, di cui parleremo nella prossima puntata, è lo strumento di conoscenza più raffinato costruito dal genere umano. Ciò non toglie il fatto che le forze nucleari forti sono ancora lontane da un loro completo inquadramento. Per la forza elettromagnetica, al contrario, la teoria in nostro possesso è assolutamente esauriente.

7

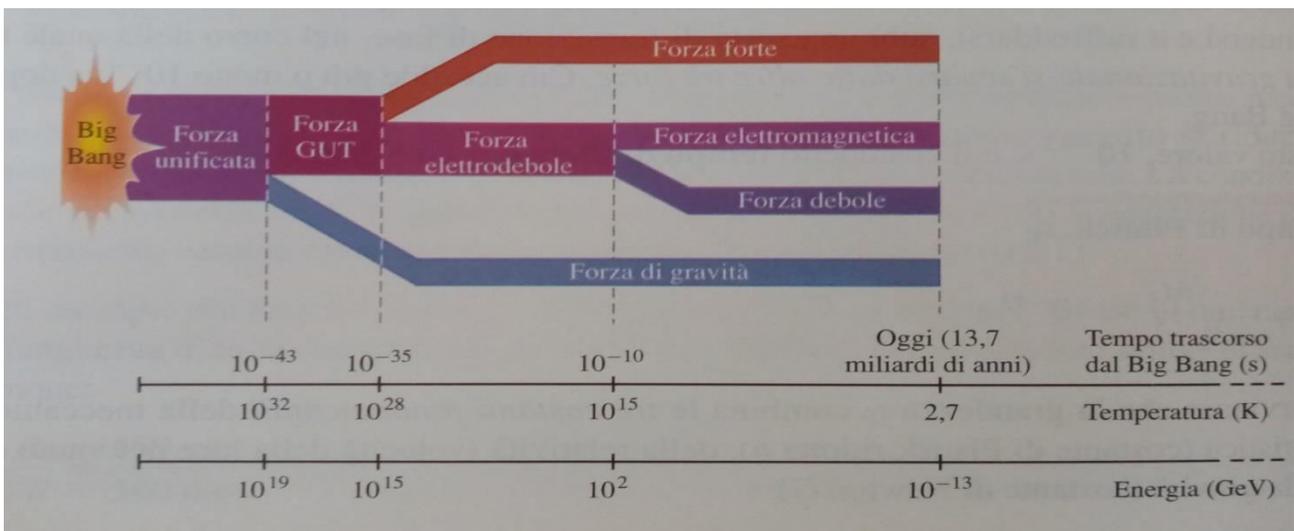
Qualche ricordo personale degli anni '70, quando frequentavo l'Istituto di Fisica di Padova. In quegli anni, non c'erano numero della rivista delle Scienze che non parlasse dei quark. Si restava affascinati dalle continue scoperte di nuove particelle e da questi strani attributi che si assegnavano ai quark, i sapori, i colori. A Padova i professori erano tutti specialisti di fisica delle alte energie. Lavoravano quasi tutti all'INFN di Legnaro e quindi l'ambiente era sempre permeato di notizie sulle tematiche di quanto vi scrivo. Non a caso, la direttrice dell'Istituto, Massimilla Baldo Ceolin, aveva essa stessa scoperto una delle componenti di quello zoo che si andava via via arricchendo di nuove elusive particelle. Magari a qualcuno di voi sarà venuto il dubbio che tutti questi miliardi di euro spesi in acceleratori giganteschi potrebbero essere spesi in modo migliore. In fin dei conti si scopre una particella che ha una durata di vita che, a confronto, un battito d'ali di farfalla rappresenta un'eternità. Si possono fare varie considerazioni su quel dubbio, ma io ve ne proporrò una personale. Poco prima della laurea, nell'ambito dell'esperienze che si facevano nel laboratorio di nucleare, ebbi modo di studiare e sperimentare la NMR, vale a dire la risonanza magnetica nucleare. Se ben ricordo, si basava sui moti di precessione degli spin dei protoni di idrogeno sottoposti a campi magnetici variabili. Non mi risulta che tale tecnica fosse usata a quel tempo nella diagnostica medica. Avrebbero dovuto passare vari anni prima di considerarla una metodica fondamentale in medicina. Ora si chiama semplicemente risonanza magnetica, hanno tolto l'aggettivo nucleare, perché ai più suona come termine molto pericoloso. Richiama le armi nucleari e la radioattività. E' l'eterno tema della scienza: fiumi di soldi spesi, ma qualsiasi nuova conoscenza può aprire delle prospettive per migliorare la vita delle persone.

E infine andiamo a fornire qualche ulteriore notizia a completamento di quanto abbiamo detto sul Modello Standard, senz'altro la costruzione più raffinata prodotta dall'intelligenza della specie umana. Nell'immagine che riporto sotto c'è uno schema che riassume i costituenti fondamentali della materia: le molecole sono composte di atomi, gli atomi hanno un nucleo centrale circondato da una nuvola elettronica, il nucleo è formato da protoni e neutroni. Questi ultimi sono formati da quark.



Il Modello Standard ha 12 oggetti fondamentali, i sei leptoni e i sei sapori di quark. Inoltre comprende poi un'altra classe di particelle, i bosoni vettori che trasmettono le interazioni fondamentali. Questi quanti di campo sono i fotoni dell'interazione elettromagnetica, i gluoni responsabili dell'interazione tra i quark nella forza nucleare forte e i tre bosoni W^+ , W^- e Z^0 che mediano le forze nucleari deboli. C'è

anche un altro bosone di recente rilevamento, il bosone di Higgs, di cui parleremo in breve più avanti. Nell'elenco precedente, non compaiono i quanti di interazione della quarta forza, quella gravitazionale. I bosoni vettori di questa forza si chiamerebbero gravitoni, ma non sono mai stati rivelati. Due motivi non ci hanno permesso fino ad ora la loro scoperta (e forse mai li troveremo): il primo motivo è che la forza gravitazionale ha un'intensità infinitamente minore delle altre tre e, quindi, per studiarla, dovremmo disporre di energie inimmaginabili. Paradossalmente, tale interazione è quella che regola l'universo a grande scala: pianeti, stelle, galassie si sono formate grazie alla interazione gravitazionale. Il secondo motivo consiste nel fatto che noi non disponiamo di una teoria quantistica della gravitazione. Il Modello Standard è una teoria di campo quantistica: mette insieme la teoria dei campi della relatività speciale einsteiniana con la meccanica quantistica. Essa descrive la realtà fisica sotto forma di campi, che sono enti fisici che assumono valori particolari in ogni punto dello spazio-tempo. La meccanica quantistica applicata ai campi prescrive che, se si vuole studiare un campo, si debbano identificare i suoi quanti, quelli che prima abbiamo denominato bosoni vettori, cioè gli "oggetti che veicolano l'interazione". Il fatto che non si siano ancora identificati i quanti dell'interazione gravitazionale, i gravitoni, rende il Modello Standard una teoria incompleta. I fisici ritengono che essa sia parte di una teoria complessiva, denominata Teoria del Tutto che unifichi le quattro interazioni fondamentali in un solo modello. Ma questo apre un altro capitolo che svilupperemo in seguito, quando parleremo dell'Universo. Se guardate l'immagine sottostante, vedrete quale situazione andremo a sviluppare: essa contiene, anche nel dettaglio numerico, gran parte delle nostre conoscenze del Modello Standard applicato all'Universo. Forza unificata sta in qualche modo per "Teoria del Tutto".



Gli scienziati hanno la vanità di avere un'idea accettabile di quanto sia successo fino ad un tempo vicinissimo al momento ZERO della nascita dell'Universo, chiamato Big Bang. E' il tempo di Planck, cioè 0, quarantatré zeri e poi uno alla fine: un tempo talmente breve da non potersi neppure immaginare. Da quel momento in poi l'evoluzione subita dall'Universo ha una teoria adeguatamente completa e autoconsistente. Non potremo invece mai avere informazioni all'indietro, da quel tempo al tempo ZERO quando tutto ha avuto inizio, quando un lampo di energia inimmaginabile diede origine dapprima alla radiazione e successivamente alla materia come oggi la conosciamo.

Nei mesi scorsi vi ho intrattenuto con una sintesi improvvisata sulle conoscenze attuali sul tema delle particelle elementari e sul modello standard. Vi avevo detto che avrei condensato il tutto in un unico pdf per una più comoda lettura. Ho trovato un po' di tempo per produrlo. Avrei voluto fare una sintesi più completa, ma mi sono invece limitato, per pigrizia, a correggere qualche errore evidente. Inutile tentare di scrivere un resoconto più completo... già vi ho detto che una qualsiasi riga di quello che ho scritto trova centinaia di libri nelle letterature scientifica. Per chi avesse avuto la pazienza di leggere quanto ho scritto ed avesse maturato la convinzione di non averci capito assolutamente nulla, posso proporvi una mia esperienza simile, che vi potrà servire per la vostra autostima. Ad inizio anni 2000 acquistai e lessi il libro di Brian Greene, "L'Universo elegante". Dopo una ricca prefazione di fisica, trattava gli argomenti di cui vi ho parlato. Ebbene, la prima parte, un centinaio circa di pagine, fu per me un ottimo ripasso di fisica. Avendo uno straccio di laurea in quella materia, non trovai grosse difficoltà di comprensione. I problemi arrivarono nelle successive duecento pagine: la lettura diventò via via più complessa e fu sempre più chiaro che la mia comprensione sarebbe stata oltremodo limitata. Già in difficoltà con le quattro dimensioni spazio-temporali della fisica relativistica, mi ritrovai in una selva oscura quando le dimensioni si ampliarono inesorabilmente fino ad arrivare a ben undici. M-teoria e superstringhe divennero concetti impossibili da scalare. In genere, quando un qualsiasi libro di narrativa dopo le primi dieci o venti pagine mi annoia, abbandono la lettura. In quel caso, trattandosi di un libro scientifico, tenni duro ed arrivai alla fine, non avendo capito che un decimo di quanto letto. Ma considerai quel libro come il più bel libro mai letto. Non importa se poco avevo compreso. Alla fine, era stato affascinante seguire quel percorso così pieno di incredibili deduzioni e di fantastiche teorie, sempre però suffragate da un robusto apparato scientifico.

Se leggerete la parte finale del pdf che conto di proporvi tra qualche giorno, potrete comunque rinforzare la vostra idea di non avere capito nulla, in quanto affronterò l'ultimo paragrafo, quello riguardante la particella di Higgs, il cui fascino è anche superiore, se possibile, a quello dei colorati quark. Approfitterò di quell'ultima descrizione per parlarvi un po' dell'LHC, l'acceleratore di particelle che ha permesso di scoprire nel 2012 quest'ultimo elusivo membro dello zoo della fisica delle alte energie, quello che è stato anche chiamato "particella di Dio".

La "particella di Dio" – La particella di Higgs

Nell'autunno del 2009 iniziava a funzionare presso il CERN il Large Hadron Collider (LHC). Nella sua galleria circolare lunga 27 km scavata nel sottosuolo di Ginevra due fasci di protoni, dopo essere stati accelerati in direzioni opposte da un complesso sistema di magneti acceleratori, collidevano fra loro a velocità prossime a quella della luce. L'urto e la successiva produzione di particelle erano il materiale di studio in cui si cimentavano i circa 2000 fisici che lavoravano all'LHC, provenienti da 15° università di 34 diverse nazioni. Tremila grossi magneti superconduttori, mantenuti alla temperatura di meno 270 gradi centigradi, producevano un campo magnetico 100.000 volte maggiore di quello terrestre. Tale campo incurvava le traiettorie dei protoni nella galleria circolare e collimava il fascio per arrivare all'urto finale. I prodotti dell'urto erano rivelati da due rivelatori, l'Atlas ed il CMS, dislocati in due punti diversi della galleria. L'Atlas era alto come un palazzo di sei piani e lungo 44 metri. Il CMS aveva una massa di 12.500 tonnellate. Questi dati per dare una stima della grandiosità del progetto.

Il lavoro principale dell'LHC fu quello di cercare una fantomatica e importante particella, teorizzata da Higgs già negli anni sessanta. Per decenni i fisici hanno dato la caccia a quell'oggetto. Purtroppo il

modello standard non dava alcuna indicazione teorica sulla sua massa e quindi la sua ricerca costituiva una caccia al buio. Il premio Nobel Lederman così la descriveva: “Noi pensiamo che vi sia uno spettro che si aggira per l’Universo, che ci impedisce di conoscere la reale natura della materia. E’ come se qualcosa, o qualcuno, volesse precluderci il raggiungimento della conoscenza definitiva. La barriera invisibile che ci impedisce di conoscere la verità si chiama “campo di Higgs”. Il campo di Higgs compie le sue stregonerie mediante una particella che va sotto il nome di particella di Higgs”. Non a caso Lederman la chiamò nel suo libro “goddamn particle” (particella maledetta), ma l’editore ne cambiò il nome in “God particle”, particella di Dio. Esperienze precedenti condotte con il LEP (Large Electron-positron Collider, la versione precedente dell’LHC) avevano escluso per la particella masse inferiori a circa 155 Giga-eV (miliardi di elettronVolt: GeV). Al Tevatron americano avevano invece escluso masse nell’intervallo tra 160 e 170 Giga-eV.

Il 13 dicembre 2011 i fisici del CERN annunciavano che era stata individuata una particella tramite Atlas e CMS di massa compresa tra 124 e 126 GeV che aveva tutte le caratteristiche proposte per la particella di Higgs. Il 5 aprile 2012 il fascio di protoni raggiungeva l’energia di 8.000 miliardi di eV (8 Tera-eV: 8 TeV). Successivi esperimenti con tali energie permettevano di annunciare il 4 luglio 2012 la conferma del ritrovamento della particella, assegnandole una massa di 126,5 GeV per Atlas e 125,3 GeV per CMS. Negli anni successivi si affinarono ancora di più le caratteristiche della particella, utilizzando l’acceleratore ad energie di 13 TeV, vicine alla massa prevista dal progetto LHC di 14 TeV. Ricorderete forse di quegli anni l’irrazionale paura comunicata da qualche organo di stampa che intravedeva in questi urti ad altissima energia un rischio di immani disastri, se non quella di sfidare direttamente qualche divinità (!). Dopo questo resoconto storico, vediamo brevemente la fisica della particella che stiamo considerando. Ricorderete che l’interazione elettrodebole era costituita dalla forza nucleare debole e dalla forza elettromagnetica. La forza nucleare debole si avvale di tre quanti, il Z-zero, il W+ e il W-, tutti bosoni (quindi a spin intero). La forza elettromagnetica ha come unico quanto, invece, il solo fotone. Orbene, il modello standard prevedeva che questi quattro quanti non dovessero avere alcuna massa. Nella realtà, solo il fotone obbediva a questa predizione. Le masse dei bosoni Z e W invece erano considerevoli, poco meno di 100 masse protoniche. Tale contraddizione bloccò a lungo lo sviluppo delle teorie di gauge che fanno parte del modello standard e che sono complesse teorie basate sulle simmetrie. Higgs ed altri cercarono la soluzione al problema postulando un meccanismo che fosse in grado di dotare di massa i quanti del campo elettrodebole, in modo da poter mantenere la struttura che genera le interazioni a partire dalle simmetrie, pur avendo quanti dotati di massa. Il più semplice meccanismo in grado di dotare di massa i quanti dell’interazione elettrodebole consisteva nell’ipotizzare la presenza di un particolare campo bosonico a spin zero, a sé stante, in grado di interagire con i quanti dell’interazione elettrodebole (esclusi i fotoni) e di fornire loro una massa. I quanti di questo particolarissimo campo erano appunto le particelle di Higgs.

Secondo la teoria cosmologica prevalente, il campo di Higgs permea tutto lo spazio vuoto dell’universo in qualsiasi istante. Nei momenti iniziali (in termini del miliardesimo di secondo) dopo il Big Bang tale campo avrebbe subito un processo di rottura spontanea della simmetria di gauge elettrodebole, che prevedeva masse zero per tutti i suoi quattro quanti. Dal meccanismo di Higgs deriva anche in modo diretto la massa dei leptoni. Il campo di Higgs sarebbe responsabile anche della massa dei quark. Mentre per il campo elettrodebole le conoscenze sembrano sufficientemente consolidate, per quanto riguarda l’estensione del meccanismo di Higgs ai quark le previsioni del modello sono alquanto incerte e poggiano soprattutto su condizioni create ad hoc e non a deduzioni logiche derivanti dal modello stesso.